

## Mit Stop-Motion-Animationen Vorstellungen zu Mechanismen analysieren

In den Bildungsstandards für die allgemeine Hochschulreife der Kultusministerkonferenz (2020) nehmen Reaktionsmechanismen der organischen Chemie (wieder) eine zentrale Rolle im Basiskonzept „Chemische Reaktion“ ein. Die Behandlung einer Reihe von Reaktionsmechanismen wird verbindlich vorgeschrieben, unter anderem die nucleophile Substitution. Empirische Befunde aus der Hochschuldidaktik legen jedoch nahe, dass das Lernen von Reaktionsmechanismen häufig zum Auswendiglernen statt zum Konzeptverständnis führt (Grove & Bretz 2010) und vielen Studierenden der Nutzen von Reaktionsmechanismen unklar ist (Anderson & Bodner 2008). Es stellt sich also die Frage, wie die Behandlung von Reaktionsmechanismen im Chemieunterricht nachhaltig Prozessorientierung und mechanistisches Denken fördern kann (Graulich & Schween 2017; Pölloth & Schwarzer 2023).

### Theoretischer Hintergrund

Reaktionsmechanismen beschäftigen sich mit der Frage nach dem „Wie und Warum“ chemischer Reaktionen und führen diese auf Interaktionen zwischen Entitäten zurück (Graulich 2023). Das dafür benötigte mechanistische Denken ist nicht nur für chemische Reaktionen wichtig, sondern im Allgemeinen für die Konstruktion von wissenschaftlichen Erklärungen (Cooper 2015; Andrade, Shwartz, Freire & Baptista 2022). Dabei ist es zentral, an das Vorwissen und die Vorstellungen der Lernenden anzuknüpfen (Cooper 2014). Hammer, Elby, Scherr & Redish (2005) gehen davon aus, dass das Vorwissen von Lernenden aus vielfältigen, locker verknüpften und in sehr verschiedenen Zusammenhängen erworbenen Ideen („Ressourcen“) aufgebaut ist. In Problemlösesituationen greifen Lernende deshalb selten auf *ein* festes, kohärentes (Fehl-)Konzept zurück, sondern aktivieren abhängig vom Kontext verschiedenste Ressourcen. In der Lehrpraxis muss deshalb „*in situ*“ analysiert werden, welche Ressourcen von den Lernenden im spezifischen Kontext aktiviert wurden (diSessa 2014). Eine Möglichkeit für eine solche Analyse von Lernendenvorstellungen stellen *Stop-Motion-Animationen* (SMA) dar (z.B. Farrokhnia, Meulenbroeks & van Joolingen 2020; Orraryd & Tibell 2021).

### Forschungsfragen

Anhand der folgenden Fragen soll exemplarisch untersucht werden, inwiefern mit Hilfe von SMA Lernendenvorstellungen über Reaktionsprozesse analysiert werden können:

1. Wie stellen sich Oberstufenschüler:innen der Chemie intuitiv den Reaktionsprozess von nukleophilen Substitutionsreaktionen vor?
2. Welche Ressourcen aktivieren Schüler:innen, um die Wahrscheinlichkeit verschiedener Reaktionswege der nukleophilen Substitution zu bewerten?

### Methodik

In einem qualitativen Forschungsdesign wurden 55 Schüler:innen der Klassenstufe 11 – 13 an baden-württembergischen allgemeinbildenden und beruflichen Gymnasien im Schülerlabor befragt (Pölloth, Schäffer & Schwarzer 2023). Schüler:innen wurde ein einfaches Knetmodell von Brommethan und eines Hydroxid-Ions vorgelegt und sie wurden aufgefordert,

SMA zu erstellen, in denen Schritt für Schritt dargestellt wird, wie die Edukte zu den Produkten reagieren. In 23 Gruppen erstellen die Lernenden dabei 32 SMA. Die SMA wurden in Einzelbilder aufgeteilt und die Abstände zwischen den Knetkugeln wurde jeweils geometrisch bestimmt. Auf der Basis dieser normierten Abstände wurden die SMA verschiedenen Hauptkategorien zugeordnet.

Danach wurden vorgefertigte SMA der zwei Textbuch-Mechanismen  $S_{N1}$  und  $S_{N2}$  (Schmuck 2018) von Schüler:innen schriftlich bewertet. Die Bewertungen der Schüler:innen wurden im Rahmen einer qualitativen Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2016) ausgewertet, dabei ergab sich eine gute Intercoder-Reliabilität mit einem Cohen's Kappa von  $\kappa = 0.72$ .

Durch eine Lehrkräftefragebogen wurde ferner sichergestellt, dass die Schüler:innen der Stichprobe bisher noch keine Reaktionsmechanismen im Schulunterricht besprochen hatten.

## Ergebnisse und Diskussion

*Schüler:innengenerierte SMA.* In den SMA wurden fast ausschließlich die drei Grundbewegungen beobachtet, die in Abbildung 1 dargestellt sind. Es zeigt sich, dass die beiden Grundtypen [AB]/[AX] und [BA]/[BX] fast gleich häufig dargestellt werden.

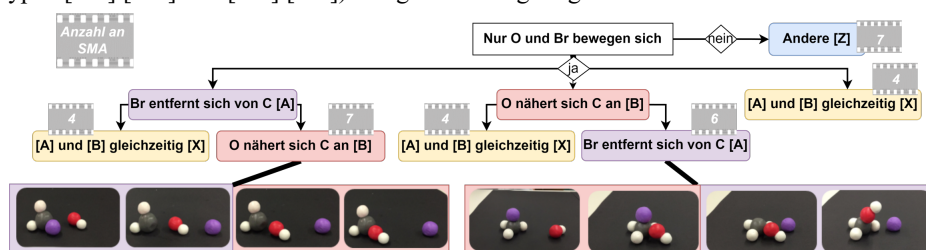


Abbildung 1: Kategorisierung der schülergenerierten SMA inkl. Ausschnitten repräsentativer SMA. Entsprechend der Legende bezeichnet „Br“ die violette Kugel, „O“ die rote Kugel und „C“ die graue Kugel (Pöloth, Schäffer & Schwarzer 2023)

Auch die fachwissenschaftlichen Textbuchmechanismen lassen sich in Kategorie [AB] ( $S_{N1}$ ) bzw. Kategorie [BX] ( $S_{N2}$ ) einordnen. Während also beide möglichen Grundtypen der Grenzmechanismen von Schüler:innen dargestellt wurde, zeigen sich einige zentrale Unterschiede. Im  $S_{N1}$ -Mechanismus entsteht durch Bewegung der H-Atome ein trigonal-planares Carbokation als Intermediat. In allen schülergenerierten SMA dieser Kategorie wird die Position der Wasserstoffatome dagegen nicht verändert. In einer  $S_{N2}$ -Reaktion findet ein Rückseiten-Angriff des Nucleophils statt, so dass im Übergangszustand das angreifende Nukleophil und die Abgangsgruppe mit dem zentralen Kohlenstoffatome über eine schwache (3-Zentren-2-Elektronen-)Bindung wechselwirken. Während Schüler:innen zwar häufig eine Art Intermediat mit fünf Bindungen am Kohlenstoffatom darstellen, wurde nie ein Rückseitenangriff gezeigt. Ebenso gibt es keine Andeutung „geschwächter“ Bindungen im Übergangszustand, die das Knetmodell z.B. durch längere Abstände ermöglichen würde. Insgesamt neun Gruppen erstellten auch mehr als ein Video. Keine dieser Gruppen modellierte dabei jedoch eine  $S_{N1}$ -artige und eine  $S_{N2}$ -artige SMA.

*Bewertung der vorgefertigten Textbuch-SMA* 79 % der Schüler:innen bewerteten die SMA der Textbuch- $S_{N2}$ -Reaktion als wahrscheinlicher; kein:e Schüler:in argumentierte, dass beide Mechanismen möglich sein könnten. Dabei argumentierten Schüler:innen am häufigsten mit Plausibilität (insgesamt 25 Codes), die mit Talanquer (2006) als *commonsense chemistry* bezeichnet werden können. Schüler:innen verwiesen dabei z.B. auf fehlende Ursachen: „Video 2

*[S<sub>N</sub>2-SMA] ist wahrscheinlicher, da in Video 1 [S<sub>N</sub>1-SMA] sich das Bromid ohne Grund abspaltet und erst anschließend, sich die das Hydroxid bindet.*“ Fast genauso häufig (23 Codes) argumentierten Schüler:innen mit chemischen Bindungen. Besonders oft wurde dabei auf „freie“ oder „besetzte“ Bindungen verwiesen, z.B. sei in einem S<sub>N</sub>2-Mechanismus „keine Bindung frei, bis das Brom weg war.“ Interessanterweise wurde dasselbe Argument auch verwendet, um für S<sub>N</sub>2-Reaktionen zu argumentieren, da „durch das Hinzufügen der Hydroxy-Gruppe das C-Atom zu viele Bindungen eingeht und deshalb das Br abspalten muss“. Auch Wechselwirkungen zwischen den Entitäten wurden relativ häufig (21 Codes) genannt, z.B. dass „OH stark negativ ist und das Bromatom somit abstößt.“ 17 Argumente wurden in weiteren Kategorien eingeordnet. Dabei ist auffällig, dass in der ganzen Stichprobe nur einmal auf energetische Aspekte verwiesen wurde.

### **Limitationen**

Die vorgestellte Studie untersucht die erste Begegnung von Schüler:innen mit Reaktionsmechanismen. Deshalb müssen viele zentrale Aspekte (z.B. Einfluss von Substituenten, Lösungsmittelleffekte) vernachlässigt werden.

Das verwendete Knetstoffmodell stellt eine sehr stark vereinfachte Modellierung der Teilchenebene dar. Für die mechanistische Erklärung von Reaktionsmechanismen ist eine Argumentation auf der elektronischen Ebene nötig, die mit dem verwendeten Modell nicht möglich ist. Es sollte jedoch beachtet werden, dass insbesondere gängige Kugel-Stab-Modelle die Darstellung der für nucleophile Substitutionsmechanismen nicht erlauben.

Im Projekt wurden nur die Ergebnisse (SMA), aber nicht die Modellierungsprozesse der Schüler:innen untersucht. Die Analyse der Modellierungsprozesse könnte noch tiefere Einblicke in die Denkprozesse der Schüler:innen ermöglichen (Orrary & Tibell 2021).

### **Diskussion und Implikationen**

Die vorliegende Ergebnisse zeigen, dass viele Schüler:innen schon vor ihrem ersten Kontakt mit klassischen organischen Reaktionsmechanismen in der Lage sind, Hypothesen über Reaktionsprozesse aufzustellen und mechanistisch zu argumentieren. Sie beziehen sich dabei auch auf Entitäten, die nicht im Modell sichtbar sind, wie z.B. chemische Bindungen oder Wechselwirkungen. In Übereinstimmung mit der Ressourcentheorie zeigt sich, dass Schüler:innen diese Argumente nicht kohärent verwenden, sondern häufig „on the fly“ eine Begründung konstruieren (Macrie-Shuck & Talanquer 2020).

Sowohl in den erstellten SMA als auch in den Argumentationsmustern wird deutlich, dass Lernendenvorstellungen zur chemischen Bindung häufig nicht produktiv für mechanistische Argumentationen genutzt werden. Sehr häufig deuten die Argumente der Schüler:innen auf ein statisches Verständnis von chemischen Bindungen an, die stark an die Darstellung von Bindungen in klassischen Kugel-Stab-Molekülbaukästen erinnern (Zohar & Levy 2019; Nahum, Mamlok-Naaman, Hofstein & Krajcik 2007). Auch Ressourcen zu energetischen Aspekten sollten gezielt im Unterrichtsverlauf aktiviert werden, da Schüler:innen diese fast immer in ihren Argumentationen vernachlässigen (Pölloth, Diekemper & Schwarzer 2023).

Zusammenfassend zeigen die vorliegende Auswertungen am Beispiel des Reaktionsmechanismus der nucleophilen Substitution, wie SMA genutzt werden können, um die aktivierten Ressourcen von Schüler:innen zu analysieren. Dadurch kann zum einen in der Lehre an vorhandenen Wissensselementen angeknüpft werden, zum anderen wird auch deutlich in welchen Bereichen weitere kognitive Ressourcen gezielt getriggert oder aufgebaut werden sollten, um eine tiefergehende mechanistische Argumentation zu ermöglichen.

## Literatur

- Anderson, T.L. & Bodner, G.M. (2008). What can we do about 'Parker'? A case study of a good student who didn't 'get' organic chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 9(2), 93–101.
- Andrade, V., Shwartz, Y., Freire, S. & Baptista, M. (2022). Students' mechanistic reasoning in practice: Enabling functions of drawing, gestures and talk. *Science Education*, 106(1), 199–225.
- Cooper, M.M. (2014). Evidence-based reform of teaching and learning. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 406(1), 1–4.
- Cooper, M.M. (2015). Why Ask Why? *Journal of Chemical Education*, 92(8), 1273–1279.
- diSessa, A.A. (2014). The construction of causal schemes: learning mechanisms at the knowledge level. *Cognitive Science*, 38(5), 795–850.
- Farrokhnia, M., Meulenbroeks, R.F.G. & van Joolingen, W.R. (2020). Student-Generated Stop-Motion Animation in Science Classes: a Systematic Literature Review. *Journal of Science Education and Technology*, 29(6), 797–812.
- Graulich, N. (2023). Reaktionsmechanismen beschreiben, erklären und vorhersagen. Mechanistisches Denken - oder die Frage nach dem Wie und Warum chemischer Reaktionen. *Naturwissenschaft im Unterricht Chemie*, (195), 7-11.
- Graulich, N. & Schween, M. (2017). Carbenium-Ionen – Schlüsselstrukturen für prozessorientierte Betrachtungen organisch-chemischer Reaktionen. *Praxis der Naturwissenschaften Chemie in der Schule*, 66(1), 24–28.
- Grove, N.P. & Bretz, S.L. (2010). Perry's Scheme of Intellectual and Epistemological Development as a framework for describing student difficulties in learning organic chemistry. *Chemistry Education Research and Practice*, 11(3), 207–211.
- Hammer, D., Elby, A., Scherr, R.E. & Redish, E.F. (2005). Resources, framing, and transfer. In Mestre, J. (Hrsg.), *Transfer of Learning from a Modern Multidisciplinary Perspective* (S. 89–120). Greenwich, CT: Information Age Publishing.
- Kuckartz, U. (2016). *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung*, Weinheim: Beltz.
- Kultusministerkonferenz (2020). *Bildungsstandards im Fach Chemie für die Allgemeine Hochschulreife*.
- Macrie-Shuck, M. & Talanquer, V. (2020). Exploring Students' Explanations of Energy Transfer and Transformation. *Journal of Chemical Education*, 97(12), 4225–4234.
- Nahum, T.L., Mamlok-Naaman, R., Hofstein, A. & Krajcik, J. (2007). Developing a new teaching approach for the chemical bonding concept aligned with current scientific and pedagogical knowledge. *Science Education*, 91(4), 579–603.
- Orraryd, D. & Tibell, L.A.E. (2021). What can student-generated animations tell us about students' conceptions of evolution? *Evolution: Education and Outreach*, 14(1).
- Pöllth, B., Diekemper, D. & Schwarzer, S. (2023). What resources do high school students activate to link energetic and structural changes in chemical reactions? – A qualitative study. *Chemistry Education Research and Practice*, 24(4), 1153–1173.
- Pöllth, B., Schäffer, D. & Schwarzer, S. (2023). Using Stop Motion Animations to Activate and Analyze High School Students' Intuitive Resources about Reaction Mechanisms. *Education Sciences*, 13(7), 759.
- Pöllth, B. & Schwarzer, S. (2023). Reaktionsmechanismen in der Schule: eine On-Off-Beziehung - Fachliche und schulpraktische Perspektiven auf einen neuen alten Lerngegenstand. *Naturwissenschaft im Unterricht Chemie* (195), 2-6.
- Schmuck, C. (2018). *Basisbuch Organische Chemie*, Hallbergmoos: Pearson Education.
- Talanquer, V. (2006). Commonsense Chemistry: A Model for Understanding Students' Alternative Conceptions. *Journal of Chemical Education*, 83(5), 811.
- Zohar, A.R. & Levy, S.T. (2019). Students' reasoning about chemical bonding: The lacuna of repulsion. *Journal of Research in Science Teaching*, 56(7), 881–904.